

17 M. LATIF

Simulation und Vorhersage von ENSO-Extremen

1 Einleitung

Seit der fundamentalen Arbeit von LORENZ (1963) wissen wir, dass die theoretische Grenze für Wettervorhersagen bei etwa zwei Wochen liegt. Dies resultiert aus dem chaotischen Charakter der Atmosphäre, der dazu führt, dass noch so kleine Fehler in den Anfangsbedingungen rasch anwachsen und sich die Güte von Wettervorhersagen innerhalb einiger Tage schnell vermindert. Da die Wettervorhersage mathematisch gesehen ein Anfangswertproblem darstellt und wir den Anfangszustand niemals exakt bestimmen können, werden wir diese theoretische Grenze der Wettervorhersagbarkeit von etwa zwei Wochen auch in der Zukunft nicht entscheidend verlängern können.

Jenseits dieser theoretischen Grenze der Wettervorhersagbarkeit gibt es aber dennoch eine Vorhersagbarkeit für die Atmosphäre, die man als jahreszeitliche oder saisonale Vorhersagbarkeit bezeichnet. Bei der Jahreszeitemvorhersage geht es im Gegensatz zur Wettervorhersage nicht darum, einzelne Wetterelemente, wie z. B. die Zugbahn eines Tiefdruckgebiets, vorherzusagen, sondern darum, das über einen bestimmten Zeitraum gemittelte Wetter, das Klima, vorherzusagen. Dies kann z. B. die Oberflächentemperatur oder der Niederschlag gemittelt über eine bestimmte Region und eine Jahreszeit sein. Die saisonale Vorhersagbarkeit hat ihren Ursprung in langsamen Veränderungen der Randbedingungen, wie z. B. Anomalien der Meeresoberflächentemperatur oder der Meereisausdehnung. Derartige Anomalien sind in der Lage, das Klima zu bestimmen, und das Klima ist dann vorhersagbar, wenn die Anomalien in den Randbedingungen selbst vorhersagbar sind.

Wir wollen uns diesen Sachverhalt mit Hilfe von Experimenten mit einem atmosphärischen Zirkulationsmodell verdeutlichen. Das hier verwendete Modell ist ECHAM, das ursprünglich vom Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage (EZMW) entwickelt und vom Max-Planck-Institut für Meteorologie im Hinblick auf Klimafragestellungen modifiziert worden ist. Wichtig in diesem Zusammenhang ist, dass ECHAM die volle Komplexität atmosphärischer Strömungen simuliert und daher ein geeignetes Labor zum Studium der atmosphärischen Vorhersagbarkeit ist. Der Durchbruch in der Jahreszeitemvorhersage glückte in den Tropen, und wir beschränken uns daher zunächst auf diese. Die Abb. 17-1 zeigt die mit dem ECHAM Modell simulierten Oberflächendruckanomalien gemittelt über den äquatorialen Ostpazifik für den Monat Dezember 1982. Die Niño3-Region, welche eine geeignete Region zur Erfassung von El Niño induzierten Schwankungen ist, umfasst das Gebiet: 5° N – 5° S und 150° W – 90° W. Die fünf verschiedenen Simulationen unterscheiden sich in den Anfangsbedingungen. Wie erwartet, entwickeln sich die individuellen Trajektorien von Anfang an

recht unterschiedlich, da die Unterschiede in den Anfangsbedingungen bereits recht groß sind. Damit bestätigen unsere Simulationen die frühen Simulationen von LORENZ. Alle fünf Simulationen sind aber mit identischen Randbedingungen durchgeführt worden, und ihren Einfluss erkennt man daran, dass der Mittelwert über den Monat Dezember 1982 in allen Realisierungen negativ ist, und dies wurde auch so beobachtet. In diesem Beispiel kommt der Meeresoberflächentemperatur im äquatorialen Ostpazifik eine entscheidende Rolle zu. Falls diese vorhersagbar gewesen wäre, hätte man auch die Veränderungen im Oberflächendruck oder im Niederschlag (z. B. über Peru) für diesen speziellen Monat vorhersagen können.

Das ECHAM Modell wurde insgesamt über 30 Jahre mit den beobachteten Meeresoberflächentemperaturen und Meereisbedeckungen angetrieben. Die Entwicklung der Oberflächendruckanomalien wiederum gemittelt über den äquatorialen Ostpazifik ist für drei Realisierungen in der Abb. 17-2 gezeigt. Wir erkennen, dass sich die niederfrequenten Schwankungen auf Zeitskalen von einer Jahreszeit aufwärts in allen drei Realisierungen recht ähnlich entwickeln. Innerhalb eines Monats entwickeln sich die individuellen Realisierungen aber recht unterschiedlich, wie in der Abb. 17-1 gezeigt. Die beiden Abbildungen verdeutlichen sehr anschaulich, dass die Limitierung der Vorhersagbarkeit von schnelllebigen Wetterphänomenen eine Vorhersagbarkeit von Klimaanomalien keineswegs ausschließt. Chaotische Systeme wie die Atmosphäre sind also unter bestimmten Bedingungen auch auf Zeitskalen von Jahreszeiten oder möglicherweise Jahren vorhersagbar. Dies ist auch die Basis für Simulationen zum anthropogenen Klimawandel (siehe Kapitel 22 (E. Roeckner) im nächsten Heft), bei denen die Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre die entscheidende Rolle spielen.

2 El Niño

Der Durchbruch in der Jahreszeitemvorhersage gelang während des internationalen Tropical Ocean Global Atmosphere (TOGA) Programms des Weltklimaforschungsprogramms (WCRP), das über zehn Jahre angelegt war (1985-1994). Entscheidende Bedeutung kam dabei der Erforschung des El Niño-Phänomens zu. Im Folgenden wollen wir uns daher etwas genauer mit dem El Niño-Phänomen befassen. Mit El Niño bezeichnet man eine großskalige Erwärmung der Deckschicht des gesamten tropischen Pazifik, die im Mittel etwa alle vier Jahre auftritt. Das Wort „El Niño“ stammt aus dem Spanischen (El Niño: Das Christkind) und wurde von den peruanischen Küstenfischern bereits im letzten Jahrhundert geprägt. Diese beobachteten, dass alljährlich zur Weihnachtszeit die Meeresoberflächentemperatur anstieg,

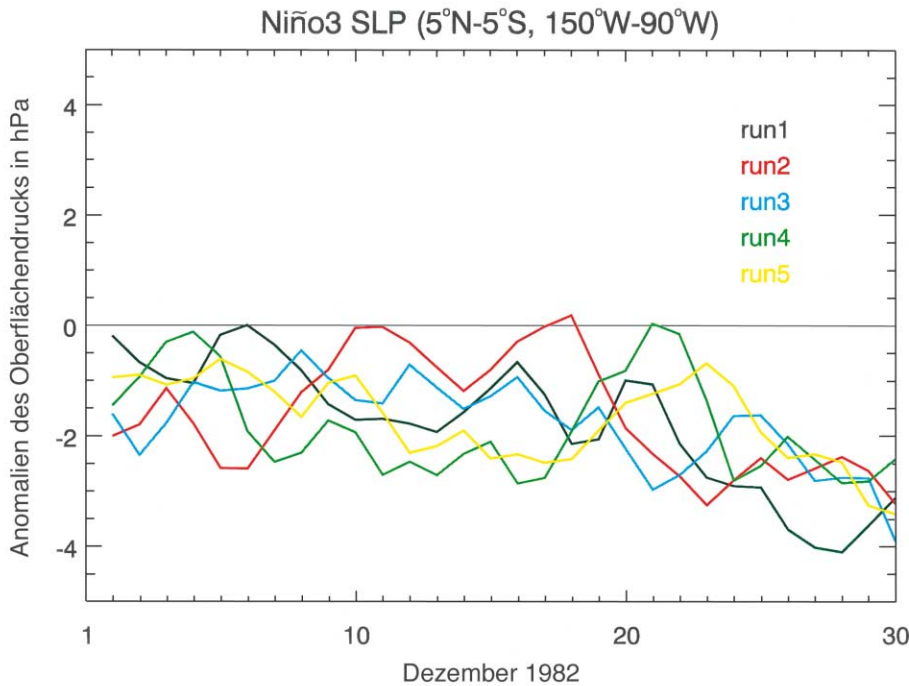


Abb. 17-1:

Mit dem ECHAM-Modell simulierte Oberflächendruckanomalien für den Monat Dezember 1982 gemittelt über die Niño3-Region. Gezeigt sind fünf Realisierungen mit verschiedenen Anfangs- aber identischen Randbedingungen (Quelle: H. POHLMANN, pers. Mitt.).

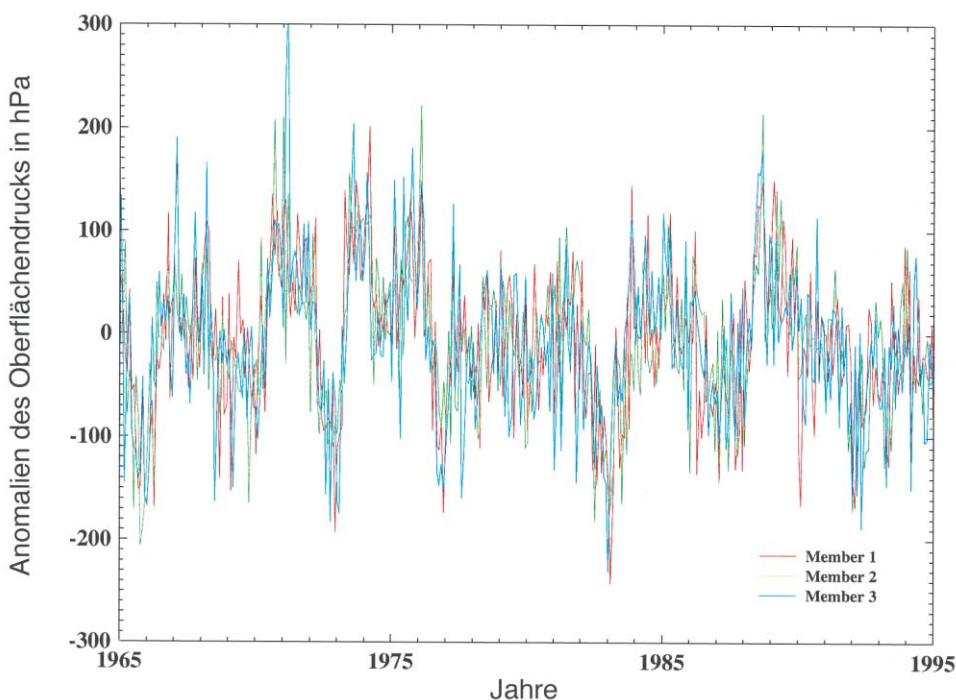


Abb. 17-2:

Mit dem ECHAM-Modell simulierte Oberflächendruckanomalien für den Zeitraum 1965-1995 gemittelt über die Niño3-Region. Gezeigt sind drei Realisierungen mit verschiedenen Anfangs- aber identischen Randbedingungen (Quelle: D. DOMMENGET, pers. Mitt.).

was das Ende der Fischfangsaison markierte, und die Fischer belegten zunächst dieses jahreszeitliche Signal mit dem Wort El Niño. In einigen Jahren allerdings war die Erwärmung besonders stark, und die Fische kehrten auch nicht wie sonst üblich am Ende des Frühjahrs wieder. Diese besonders starken Erwärmungen dauern typischerweise etwa ein Jahr lang an. Heute werden nur noch diese außergewöhnlichen Erwärmungen mit El Niño bezeichnet, die in unregelmäßigen Abständen von einigen Jahren (im Mittel etwa alle 4 Jahre) wiederkehren. Eine ausführliche phänomenologische und theoretische Beschreibung des El Niño findet man im Buch von PHILANDER (1990).

Die Abb. 17-3 zeigt die anomale Meeresoberflächentemperatur, wie sie im Winter 1997/1998 während des letzten El Niño beobachtet wurde. Der großskalige Charakter der Erwärmung ist deutlich ersichtlich: die Erwärmung erstreckt sich etwa über ein Viertel des Erdumfangs in Äquatornähe. Das für El Niño typische Erwärmungsmuster besitzt die stärksten Temperaturerhöhungen im äquatorialen Ostpazifik, mit Temperaturanomalien von über 5 °C vor der Küste Südamerikas. Mit El Niño gehen auch Veränderungen in der Meeresoberflächentemperatur in anderen Regionen einher, wie z. B. eine Erwärmung des tropischen Indischen Ozeans oder eine Abkühlung des Nordpazifiks. Letztere werden durch eine

Abb. 17-3:

Anomale Meeresoberflächentemperatur (°C), beobachtet im Winter 1997/1998 während des letzten El Niño (Quelle: NCEP).

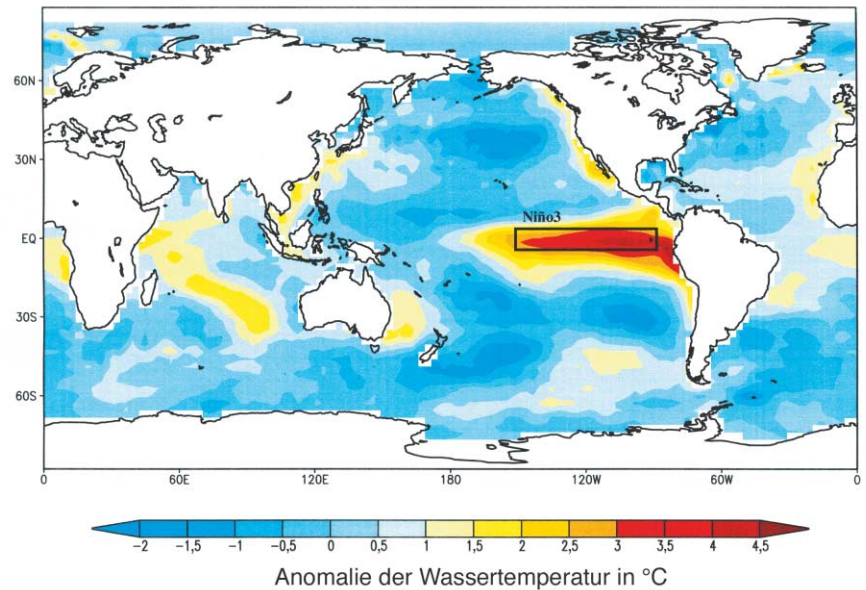
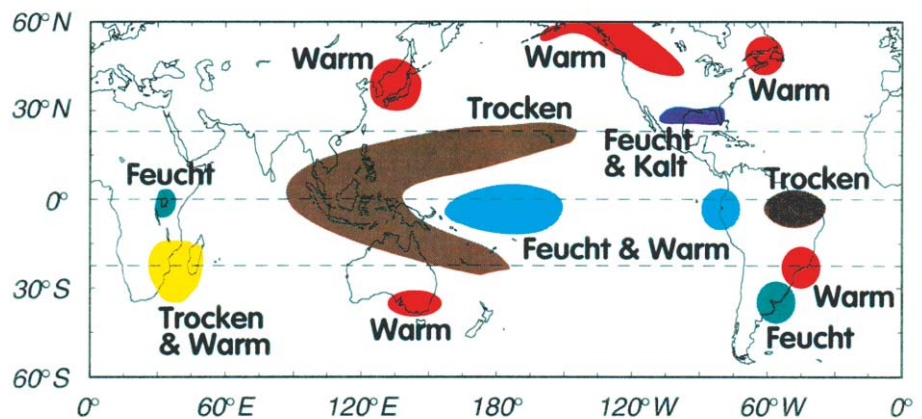


Abb. 17-4:

Globale klimatische Auswirkungen eines El Niño in der Zeit Dezember bis Februar (Quelle: NOAA).



veränderte atmosphärische Zirkulation in diesen Gebieten als Folge der El Niño-Erwärmung im tropischen Pazifik hervorgerufen.

El Niño besitzt vielfältige klimatische Auswirkungen, welche in der Abb. 17-4 schematisch zusammengefasst sind. Südostasien und Nordostaustralien leiden unter starken Dürren infolge El Niños, während es auf der anderen Seite des Pazifiks über dem westlichen Südamerika zu sintflutartigen Regenfällen kommt. Auswirkungen des El Niño findet man aber auch über Indien, dem östlichen Äquatorialafrika, dem südlichen Afrika und über Nord- bzw. Südamerika. Die Auswirkungen des El Niño auf Europa sind schwach und im allgemeinen nicht statistisch signifikant.

El Niño wirkt sich aber auch auf die Volkswirtschaften und die Gesundheitssysteme verschiedener Staaten aus. Der Kokosölpreis, beispielsweise, zeigt eine erstaunliche Korrelation mit dem Auftreten von El Niño: Etwa ein Jahr nach El Niño-Ereignissen schnellte der Kokosölpreis in die Höhe. Die Ursache für die Schwankungen im Kokosölpreis liegt in der extremen Dürre in Südostasien, wo Kokos vor allem angebaut wird. Die El Niño-bedingten Missernten in Südostasien führen zu einer Verknappung von Kokosöl, wodurch sein Weltmarkt-

preis ansteigt. Es existieren zahlreiche andere gesellschaftlich relevante Auswirkungen des El Niño. So ist z. B. die Häufigkeit von Malaria in Kolumbien ebenfalls mit dem Auftreten von El Niño verknüpft. Das anomal warme Klima in Kolumbien während El Niño-Episoden begünstigt die Vermehrung der entsprechenden Mückenarten, welche die Malaria übertragen, wodurch es zu mehr Malariainfektionen kommt.

3 El Niño und Southern Oscillation

El Niño ist eng mit der Southern Oscillation verknüpft, einem atmosphärischen Phänomen, das bereits in den zwanziger Jahren von Sir Gilbert Walker beschrieben wurde (WALKER 1923, BERLAGE 1957). Die Southern Oscillation kann man als eine Art Luftdruckschaukel verstehen, wobei die Boden-druckvariationen in der westlichen und in der östlichen Hemisphäre einander entgegengesetzt sind. Die Abb. 17-5 verdeutlicht diesen Sachverhalt. Dargestellt ist die Korrelation der Anomalien der Meeresoberflächentemperatur im Ostpazifik für die Niño3-Region mit den Anomalien des Oberflächendrucks auf der gesamten Erde. Signifikante Korrelationen existieren nicht nur im Ostpazifik, sondern auch weit entfernt von ihm, was den globalen Charakter der Southern Oscillation verdeut-

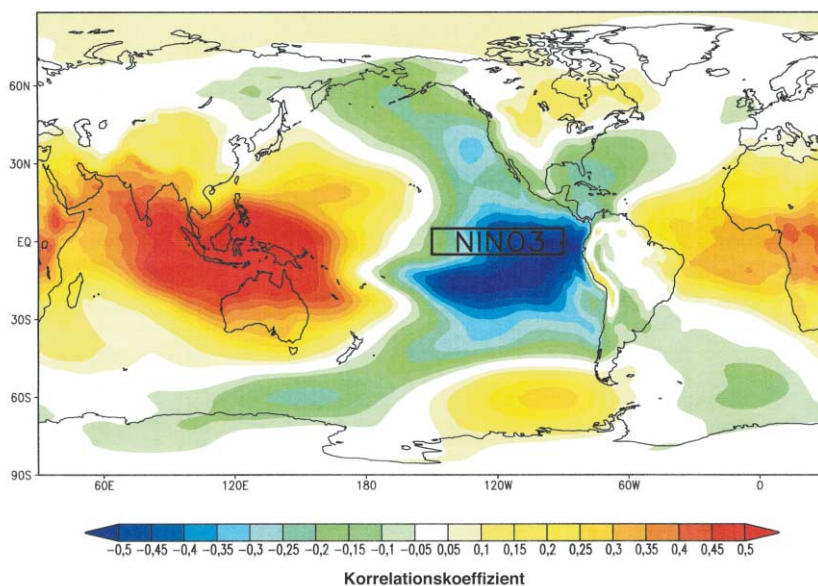


Abb. 17-5:

Die Southern Oscillation. Dargestellt ist die Korrelation der Anomalien der Meeresoberflächentemperatur im Niño-3-Gebiet mit den Anomalien im Oberflächendruck weltweit (Quelle: D. DOMMENGET, pers. Mitt.).

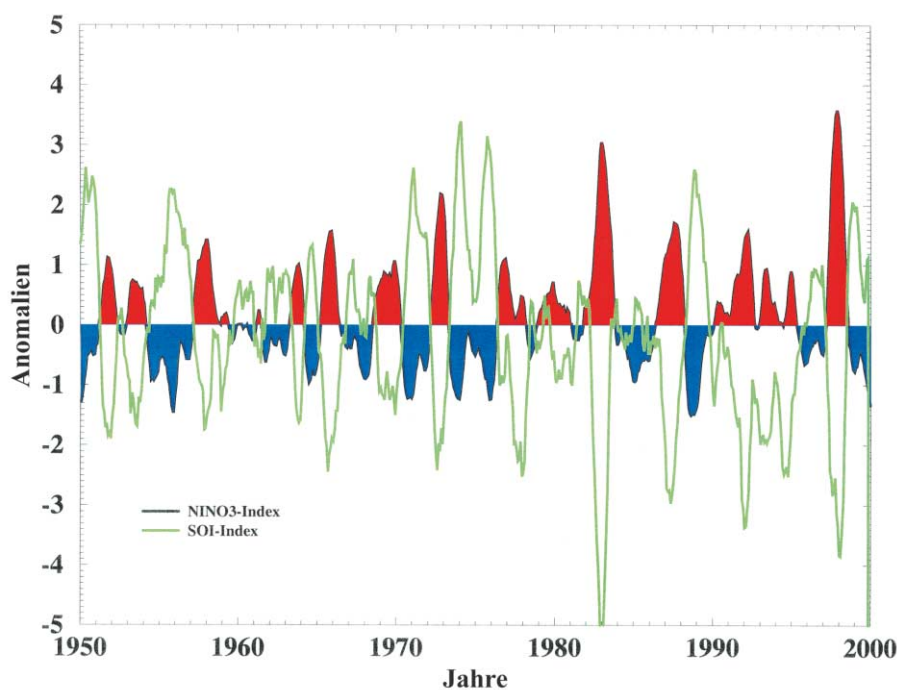


Abb. 17-6:

Zeitreihen der anomalen ostpazifischen Meeresoberflächentemperatur (Niño-3 Index) und des Southern Oscillation Index (SOI). Beide Zeitreihen sind mit einem 5-monatigen gleitenden Mittel gefiltert und normiert (Quelle: NOAA).

licht. Während eines El Niño kommt es beispielsweise zu einer Erhöhung des Drucks über Südostasien und dem westlichen Pazifik, während er im östlichen Pazifik sinkt (siehe auch Abb. 17-1), was zur Folge hat, dass sich der Druckgegensatz über dem Pazifik abschwächt und damit die Passatwinde schwächer werden.

BJERKNES (1969) war es, der als erster die enge Verbindung zwischen El Niño und Southern Oscillation erkannte und die Bedeutung von Wechselwirkungen zwischen Ozean und Atmosphäre für die Klimavariabilität im pazifischen Raum hervorhob. Die Abb. 17-6 zeigt dies anhand von zwei einfachen Indizes: der Anomalie der Meeresoberflächentemperatur im Ostpazifik und dem sogenannten Southern Oscillation Index (SOI), der die Druckdifferenz zwischen den beiden

Zentren der Southern Oscillation misst. Die beiden Zeitreihen variieren außer Phase. Beispielsweise fallen positive Anomalien der Meeresoberflächentemperatur (El Niño-Phasen) mit negativen Anomalien im SOI zusammen. Da der SOI ein Maß für die Stärke der Passatwinde über dem Pazifik ist, gehen also El Niño-Ereignisse mit abgeschwächten Passatwinden einher. BJERKNES erkannte dies und führte die Variationen in der Meeresoberflächentemperatur im äquatorialen Ostpazifik auf windinduzierte Veränderungen in der Ozeandynamik zurück. Variationen im Wärmeaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre hingegen wirken dämpfend auf die Meeresoberflächentemperaturanomalien. Wegen der engen Verbindung zwischen dem El Niño und der Southern Oscillation spricht man heute im allgemeinen vom El Niño/Southern Oscillation (ENSO)-Phänomen.

ENSO Zyklus

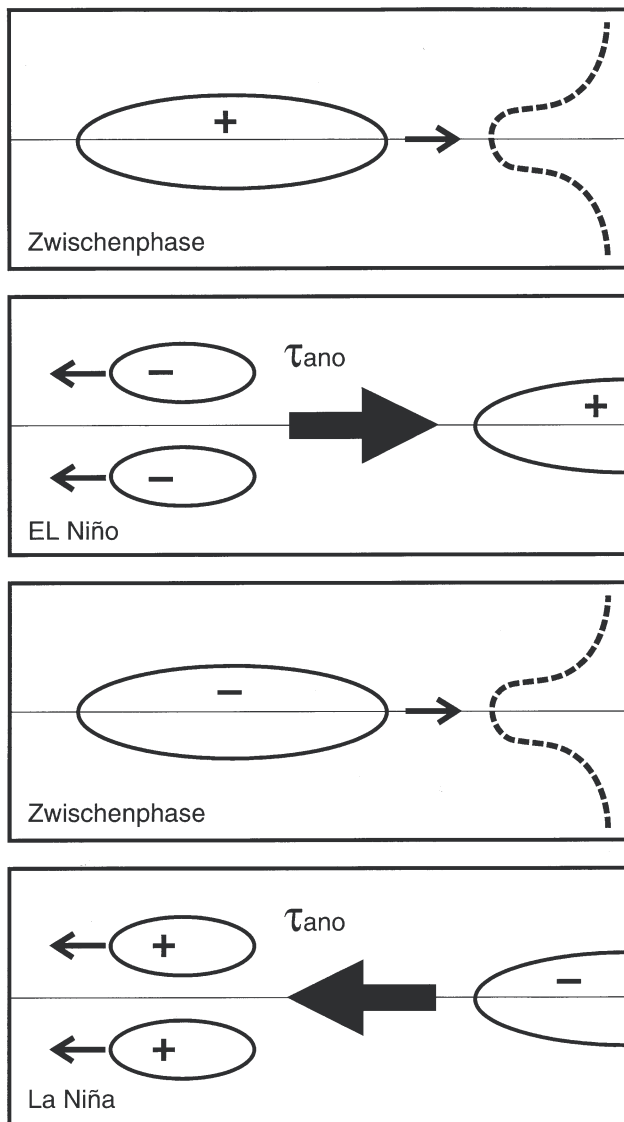


Abb. 17-7: Schematische Darstellung des „delayed action oscillator“ (Wellenmechanismus zur Erklärung von ENSO). Dargestellt sind verschiedene Phasen des ENSO-Zyklus, die jeweils etwa ein Jahr auseinanderliegen (FLÜGEL 1994).

BJERKNES erkannte außerdem, dass die Wechselwirkungen zwischen Ozean und Atmosphäre im Bereich des tropischen Pazifiks instabil sind, d. h. dass anfängliche Störungen vom gekoppelten System Ozean-Atmosphäre verstärkt werden. Nehmen wir an, dass sich der Ostpazifik infolge einer Störung erwärmt, so verringert sich der Temperaturgegensatz zwischen dem Westpazifik und dem Ostpazifik, welcher normalerweise etwa 10 °C beträgt (der Westpazifik besitzt Meeresoberflächentemperaturen von etwa 30 °C, während der Ostpazifik mit Werten von etwa 20 °C deutlich kälter ist). Dies reduziert den Druckgradienten in der Atmosphäre, was die Passatwinde abschwächt und einen reduzierten Auftrieb kalten Wassers im Ostpazifik nach sich zieht, wodurch die Meeresoberflächentemperatur im Ostpazifik weiter ansteigt

und sich die Passatwinde weiter abschwächen. Es ist diese Art von positiver Rückkopplung zwischen Ozean und Atmosphäre, welche El Niños erst ermöglichen.

4 Ein Wellenmechanismus zur Erklärung des El Niño

Die Bedeutung äquatorialer Wellen für El Niño wurde bereits von WYRTKI (1975) hervorgehoben. Er zeigte, dass das Auftreten von El Niño mit der Wanderung von äquatorialen Kelvinwellen verknüpft ist. Die Abschwächung der Passatwinde über dem Westpazifik löst Kelvinwellen aus, die ostwärts wandern und den Auftrieb kalten Wassers an die Oberfläche reduzieren, wodurch sich der Ostpazifik erwärmt. Äquatoriale Wellen beeinflussen die Meeresoberflächentemperatur nur im Ostpazifik, da dort die Thermokline (die Grenzfläche zwischen warmem Oberflächenwasser und kaltem Tiefenwasser) dicht unterhalb der Meeresoberfläche liegt. Den Kelvinwellen kommt also eine entscheidende Bedeutung bei der Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre zu: Sie sind das entscheidende Bindeglied zwischen den Windveränderungen im Westpazifik und den Temperaturveränderungen im Ostpazifik.

Abb. 17-6 macht auch den oszillatorischen Charakter von ENSO deutlich. Neben den als El Niño bezeichneten Warmphasen treten ebenso häufig Kaltphasen auf, die mit La Niña benannt werden. Dies legt die Vermutung nahe, dass ENSO auf einem Zyklus basiert. SCHOPF und SUAREZ (1988) formulierten einen derartigen Zyklus, basierend auf der Wanderung von äquatorialen Wellen (Abb. 17-7). Danach werden infolge von Windschubveränderungen während ENSO-Extremen (El Niño, La Niña) Rossbywellen im Westpazifik ausgelöst, die westwärts wandern, am Westrand in Kelvinwellen reflektiert werden, die mit einer gewissen Zeitverzögerung den äquatorialen Ostpazifik erreichen und dort die Meeresoberflächentemperatur derart verändern, dass die anfängliche Anomalie geschwächt und schließlich im Vorzeichen umgekehrt wird. Instabile Wechselwirkungen zwischen Ozean und Atmosphäre führen dann zu einem Anwachsen dieses Signals. Die Phasenumkehr wird also schon während eines Extremzustandes eingeleitet. So lösen die Windschubveränderungen während eines El Niño Rossbywellen aus, die mit verstärktem Auftrieb kalten Wassers einhergehen. Nach der Reflektion der Rossbywellen am Westrand transportieren Kelvinwellen das Signal ostwärts entlang des Äquators und führen zu einer Abkühlung im östlichen Äquatorialpazifik. Die mittlere Periode von ENSO wird nach diesem einfachen konzeptuellen Modell im wesentlichen von der Beckenbreite des Pazifik bestimmt. Es ist plausibel anzunehmen, dass ein derartiger Wellenzyklus gedämpft ist und durch das Rauschen im gekoppelten System Ozean-Atmosphäre (ähnlich einer Schaukel im Wind) kontinuierlich angefacht wird.

Gibt es Beobachtungsevidenz für die Existenz eines derartigen Oszillators? Während des TOGA-Projektes wurde ein Netz von fest verankerten Bojen im Äquatorialpazifik (das sog. TAO-array) installiert, welches Informationen aus Tiefen bis 500 m lieferte. Mit Hilfe dieser Daten konnte die Entwicklung des letzten El Niño und des darauffolgenden La Niña

Entwicklung des El Ninos 1997/98

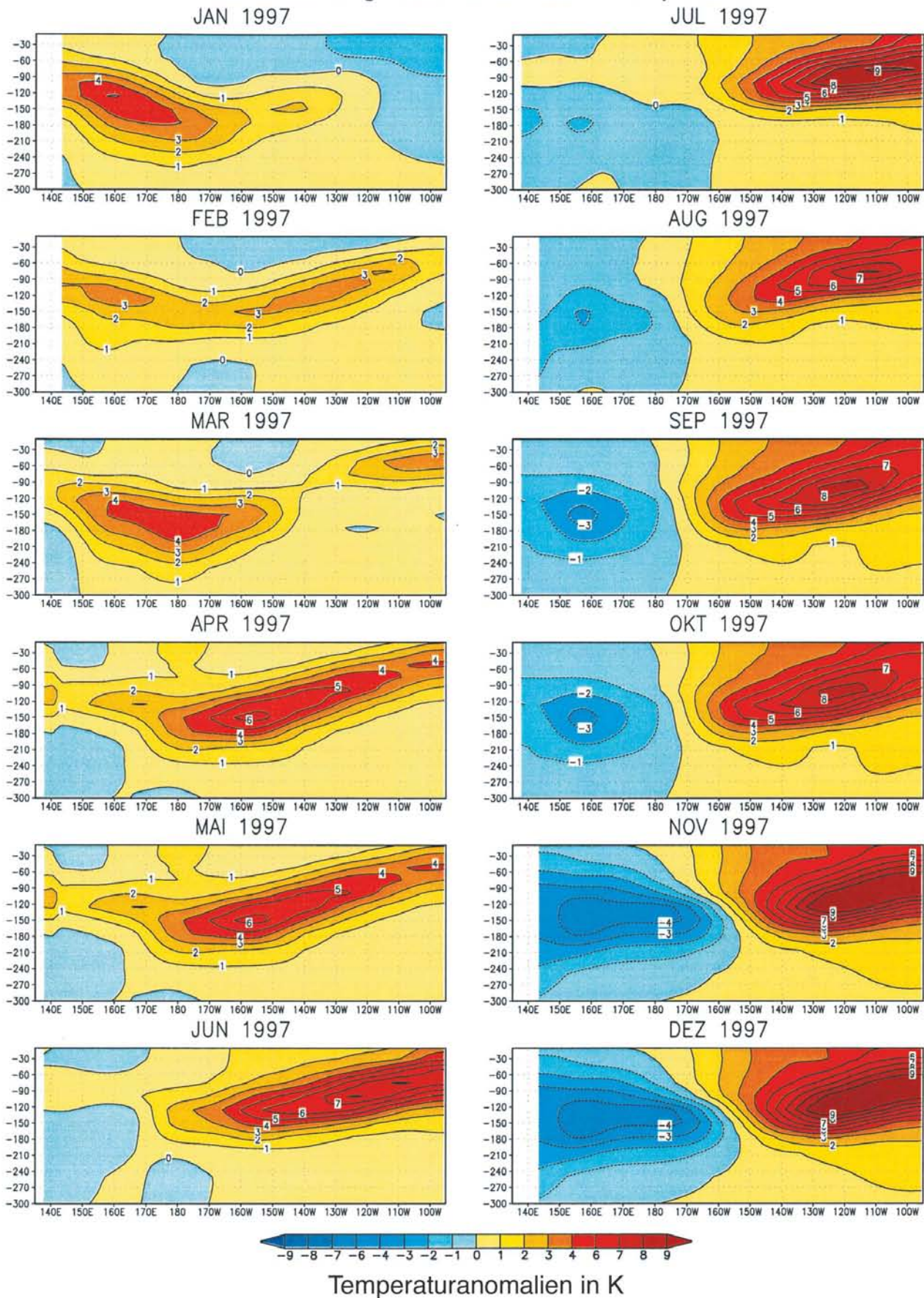


Abb. 17-8: Monatliche Anomalien der Temperatur im oberen äquatorialen Pazifik bis 300 m Tiefe längs des Äquators. Die Daten stammen von Bojen (TAO-array), die im äquatorialen Pazifik fest verankert sind (Quelle: S. SCHÖTTLE, pers. Mitt.).

Ereignisses längs des Äquators studiert werden (Abb. 17-8). Man erkannte bereits Anfang 1997, etwa ein halbes Jahr vor Einsetzen des El Niño Ereignisses, eine warme Anomalie unterhalb der Meeresoberfläche im westlichen Pazifik. Diese wanderte anschließend langsam ostwärts und in Richtung der Oberfläche. Im Sommer erreichte die Anomalie die Oberfläche und markierte den Beginn des eigentlichen El Niño Ereignisses. Während sich das El Niño Ereignis weiter verstärkte und seinen Höhepunkt Ende 1997 erreichte, erkannte man schon im westlichen Pazifik eine kalte Anomalie, aus der sich später das La Niña Ereignis des Jahres 1998 entwickelte. Diese Temperaturbeobachtungen unterstützen die Existenz des postulierten Wellenmechanismus. Insbesondere gibt es Vorboten in der Tiefe des westlichen äquatorialen Pazifik, die für die Vorhersage der Meeresoberflächentemperaturanomalien im östlichen Pazifik eine wichtige Rolle spielen.

5 El Niño Vorhersagbarkeit

Der von SCHOPF und SUAREZ (1988) vorgeschlagene Oszillator stellt sicherlich eine grobe Vereinfachung der tatsächlichen Verhältnisse dar, er beschreibt allerdings die fundamentale ENSO-Dynamik, wie anhand der Abb. 17-8 zu erkennen ist. Außerdem wird durch dieses Prototypmodell auch ersichtlich, dass ENSO bis zu einem bestimmten Grad vorhersagbar ist, was enorme praktische Bedeutung hat (LATIF et al. 1998). Prinzipiell kann man zwei Arten von Vorhersageschemata unterscheiden: Statistische und dynamische Vorhersagemodelle. Beide Arten von Vorhersagemodellen sind bisher recht erfolgreich gewesen. Hier wird im weiteren allerdings nur auf die dynamische Methode eingegangen.

ENSO-Vorhersagen werden im Prinzip wie Wettervorhersagen durchgeführt, d. h. sie stellen beide Anfangswertprobleme dar. Allerdings werden für ENSO-Vorhersagen gekoppelte Ozean-Atmosphäre-Modelle verwendet. Der ozeanische Anfangszustand kann auf unterschiedliche Art und Weise ermittelt werden. Man kann z. B. die Geschichte der beobachteten Windschubspannungen verwenden, um die Ozeankomponente anzutreiben und die Vorhersagen zu initialisieren. Diese Methode liefert eine geeignete Präkonditionierung des Ozeans, da Veränderungen seiner Dichtestruktur sich vor allem auf Windschubveränderungen zurückführen lassen. Andere Verfahren benutzen die Geschichte der beobachteten Meeresoberflächentemperaturen, und wiederum andere Verfahren assimilieren die drei-dimensionale ozeanische Dichtestruktur ins Ozeanmodell, wie sie das TAO-array liefert.

Einer der wichtigsten Parameter, die Anomalie der Meeresoberflächentemperatur im Ostpazifik, ist etwa ein Jahr im voraus mit zufriedenstellender Genauigkeit vorhersagbar. Inzwischen werden ENSO-Vorhersagen routinemäßig an verschiedenen Instituten durchgeführt und von Regierungen verwendet, um beispielsweise Entscheidungen für den Anbau landwirtschaftlicher Produkte zu treffen. Ein Beispiel für die Qualität von ENSO-Vorhersagen ist am Beispiel des letzten El Niño der Jahre 1997/1998 in der Abb. 17-9 dargestellt. Die Ergebnisse stammen vom EZMW, das inzwi-

schen routinemäßige El Niño-Vorhersagen durchführt. Das dort betriebene gekoppelte Modell besteht aus einer Version des EZMW-Atmosphäremodell und einem am Max-Planck-Institut für Meteorologie/Hamburg entwickelten Ozeanmodell. Ferner werden ozeanische Daten assimiliert, insbesondere die Beobachtungen des TAO-arrays, um die Vorhersagen zu initialisieren. Die Vorhersagen für den letzten El Niño waren sehr erfolgreich, das Modell des EZMW sagte bereits im Januar 1997 ein El Niño Ereignis vorher und konnte dann auch später die Stärke des El Niño richtig vorhersagen. Da die Schwankungen in der Meeresoberflächentemperatur im Äquatorialpazifik eng mit Veränderungen der Lufttemperatur und des Niederschlags über vielen Landregionen verbunden sind (siehe Abb. 17-4), birgt die erfolgreiche Vorhersage der Meeresoberflächentemperatur auch die Möglichkeit, klimatische Veränderungen über

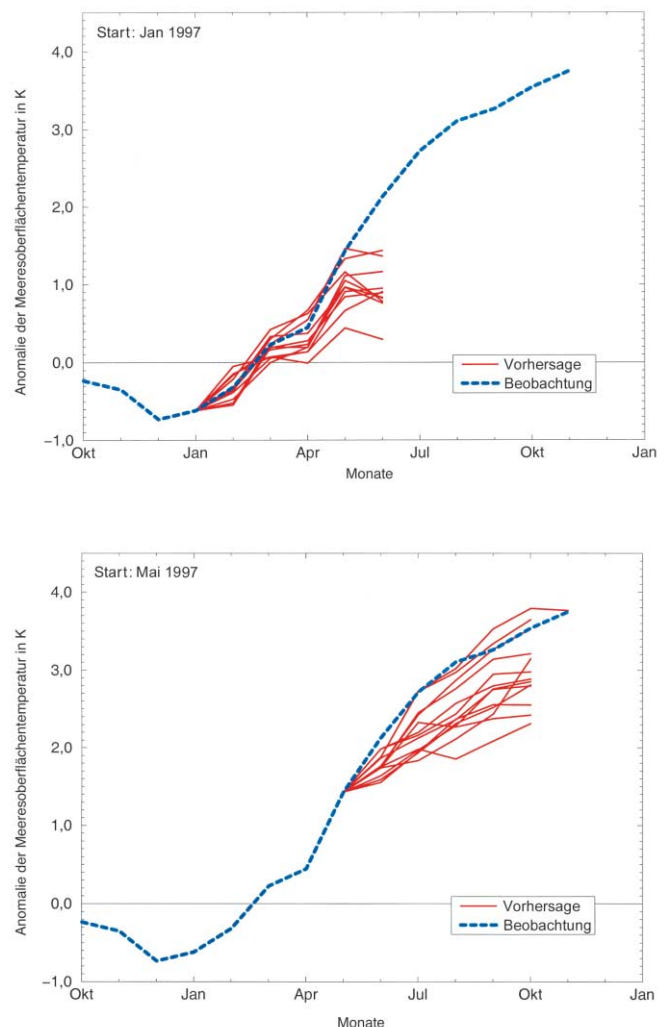


Abb. 17-9: Vorhersage des El Niño 1997/1998 mit dem gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modell des EZMW. Dargestellt sind die beobachtete Entwicklung der Meeresoberflächentemperaturanomalie im Niño3-Gebiet und die entsprechenden Vorhersagen mit dem gekoppelten Modell, die im Januar 1997 (oben) und Mai 1997 (unten) initialisiert wurden. Es wurden jeweils Ensembles gerechnet mit verschiedenen Anfangsbedingungen (Quelle: EZMW).

vielen Regionen der Erde vorherzusagen. So ist z. B. auch die Anzahl von Hurrikanen über dem Atlantik eng mit dem Auftreten von El Niño verknüpft, so dass Hurrikanvorhersagen einige Monate im voraus möglich scheinen.

6 Jenseits von El Niño

El Niño war der Durchbruch in der Jahreszeitenvorhersage. Es ist aber sicherlich nicht das einzige Phänomen, das eine gewisse Vorhersagbarkeit besitzt. PALMER und ANDERSON (1994) beschreiben eine Fülle anderer Klimaschwankungen, die möglicherweise vorhersagbar sind. Hier sind insbesondere niederfrequente Veränderungen im Niederschlag über bestimmten Gebieten Afrikas (z. B. dem Sahel) und Südamerikas (z. B. Nordost Brasilien) zu nennen. Man arbeitet z. Zt. im Rahmen des **Climate Variability and Predictability (CLIVAR)**-Programms des WCRP daran, zum einen die El Niño-Vorhersagen zu verbessern und zum anderen noch weitere Klimaphänomene zu identifizieren, die eine Vorhersagbarkeit auf saisonaler oder vielleicht sogar dekadischer Zeitskala aufweisen. Für Europa ist vor allem die **Nordatlantische Oszillation (NAO)** wichtig, die insbesondere im Winter unser Klima stark prägt. Die NAO zeigt ausgeprägte Schwankungen auf einer Vielzahl von Zeitskalen, und es wird momentan versucht, die Prozesse zu identifizieren, die für die Schwankungen der NAO verantwortlich sind. Im Zentrum des Interesses steht vor allem die Frage nach der Rolle des Ozeans für die NAO. Erste Simulationen mit dem ECHAM-Atmosphärenmodell deuten an, dass der Zustand der NAO durch Vorgabe der beobachteten Meeresoberflächentemperaturen realistisch simuliert werden kann, ähnlich der in Abb. 17-1 dargestellten Situation. Es besteht daher die Hoffnung, verlässliche Jahreszeitenvorhersagen auch auf die mittleren Breiten auszudehnen. Alle Studien deuten aber an, dass die Güte der saisonalen Vorhersagen in den Tropen diejenigen in mittleren Breiten übersteigt.

Danksagung

Der Autor bedankt sich bei S. Schöttle, D. Dommenges, H. Pohlmann, N. Noreiks und K. Müller.

Literatur

- BERLAGE, H. P., 1957: Fluctuations in the general atmospheric circulation of more than one year, their nature and their prognostic value. *K. Ned. Meteor. Inst. Meded. Verh.* **69**, 152 S.
- BJERKNES, J., 1969: Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon. Weather Rev.* **97**, 163-172.
- FLÜGEL, M., 1994: Untersuchungen zu Mechanismus und Vorhersagbarkeit von ENSO mit einem vereinfachten gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modell. Dissertation, Max-Planck-Institut für Meteorologie, *Examensarbeit Nr.* **23**, 67 S.
- LATIF, M., D. ANDERSON, T. BARNETT, M. CANE, R. KLEEMAN, A. LEETMAA, J. O'BRIEN, A. ROSATI, E. SCHNEIDER, 1998: TOGA Review Paper: "Predictability and Prediction". *J. Geophys. Res.* **103**, C7, 14,375-14,393.
- LORENZ, E. N., 1963: Deterministic non periodic flow. *J. Atmos. Sci.* **20**, 130-141.
- PALMER, T. N., D. L. T. ANDERSON, 1994: The prospects for seasonal forecasting – A review paper. *Q. J. Roy. Met. Soc.* **120**, 755-793.
- PHILANDER, S. G. H., 1990: El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation. *Academic Press*, San Diego, 293 S.
- SCHOPF, P. S., M. J. SUAREZ, 1988: Vacillations in a coupled ocean-atmosphere model. *J. Atm. Sci.* **45**, 549-566.
- WALKER, G. T., 1923: Correlation in seasonal variations of weather. VIII: A preliminary study of world weather. *Mem. Indian Meteorol. Dep.* **24**, 75-131.
- WYRTKI, K., 1975: El Niño – The dynamic response of the equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing. *J. Phys. Oceanogr.* **5**, 572-584.